

分体式混动总成引起的轰鸣噪声源辨识与优化

韦进光¹, 谢玉琳², 马翔¹, 王海军³, 苏玉龙⁴

¹上汽通用五菱股份有限公司技术中心, 广西 柳州

²柳州孔辉汽车科技有限公司技术中心, 广西 柳州

³柳州铁道职业技术学院动力技术学院, 广西 柳州

⁴湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年3月25日; 录用日期: 2022年6月23日; 发布日期: 2022年6月30日

摘要

针对某HEV混动车型样车在4000 rpm左右的转速时车内产生的轰鸣声问题, 测试发现动力总成一阶弯曲模态偏低, 通过对比同类型配置发现动力总成的弯曲模态发现, 一阶模态是影响车内轰鸣、车身抖动问题的主要原因。本文对开发车型HEV混合动力总成LV1从增强结构刚度以及加强个部件之间的连接方面进行多方面的仿真分析和测试, 以提升动力总成的一阶弯曲模态, 发现采用新方案3的DHT壳体、两电机间支架连接以及油底壳改成铝壳的组合方案使一阶弯曲模态高于设计目标210 Hz。试验结果表明该方案在20~80 Hz范围内降低了15 dB (A), 并无啸叫, 主客观评价均满足开发要求。

关键词

动力总成, 一阶弯曲模态, 有限元分析, 振动噪声, 优化设计

Identification and Optimization of Interior Roar Noise Source Caused by Split Hybrid Assembly

Jinguang Wei¹, Yulin Xie², Xiang Ma¹, Haijun Wang³, Yulong Su⁴

¹SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

²KH Automobile Technologies (Liuzhou) Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

³Institute of Power Technology, Liuzhou Railway Vocational and Technical College, Liuzhou Guangxi

⁴State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha Hunan

Received: Mar. 25th, 2022; accepted: Jun. 23rd, 2022; published: Jun. 30th, 2022

文章引用: 韦进光, 谢玉琳, 马翔, 王海军, 苏玉龙. 分体式混动总成引起的轰鸣噪声源辨识与优化[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(3): 320-331. DOI: 10.12677/met.2022.113037

Abstract

Aiming at the rumble problem occurs on a HEV hybrid model at about 4000 rpm, whose first-order bending mode of the powertrain is found low. By comparing the bending mode of the powertrain with the same configuration on other vehicles, the first-order mode is the main reason for the rumble and body jitter in this Hybrid Electrical Vehicle (HEV). The research about the development model powertrain LV1 of HEV is to enhance the structural stiffness and strengthen the connection between the components of various aspects of simulation analysis and testing, and improve the first order bending mode of the powertrain. The results show the combination method of DHT housing, bracket connection between the two motors and oil sump changed to aluminum shell with new scheme 3 makes the first-order bending mode 210 Hz, which is higher than the design target. The experiment results show that the scheme reduces 15 dB (A) in the range of 20~80 Hz without noise, and both subjective and objective evaluation meet the development requirements.

Keywords

Powertrain, First-Order Bending Mode, Finite Element Analysis, Vibration Noise, Optimal Design

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国生产制造水平的大幅提升以及汽车工业的快速进步,我国已经成为世界第一大汽车产销国。在第 75 届联合国大会上习近平主席宣布了“碳达峰”和“碳中和”发展目标[1]。混合动力和电动汽车已被证明是确保改善燃油节约和减排的很好的解决方案。目前,混合动力系统大多基于串并联配置已得到快速发展和进步。与传统车辆相比,混合动力电动汽车具有最大限度地减少油耗和排放的潜力。但是,混合动力汽车具有新的部件、动力系统,传动系统及运行模式,虽然降低了传统内燃机的噪声水平,但结构的变化致使整车在振动噪声方面出现新的发展。FEV 在混合动力系统的概念阶段布局,确保最佳的混合动力系统以及全球最优的运行策略,以降低噪声和提高 NVH 和驾驶员舒适性要求等软性要求。M Stapelbroek 等[2]介绍了一种典型的分轴混合动力的概念开发与控制过程。Yue M Y 等[3]针对性地列举了混合动力汽车存在的 NVH 问题,提出了振动噪声的传递路径控制方法。针对分体式串并联动力总成结构出现的共振问题,本论文主要分析一种在前期开发设计阶段的模态测试与目标设定方法,通过对混动总成表面激励源的降低,以减少共振和车内噪声传递的风险,达到降低车内噪声的目的。

2. 分体式混动总成 NVH 问题机理

混合动力汽车主要由发动机、发电机和电动机三种动力源组成。因此,发动机,电动机和发电机的多种不同组合会形成不同的动力源模式。混合动力汽车车内噪声产生机理如图 1 所示。

Pischinger S 等[4]通过对传动系的多体模拟,有针对性地控制电机来减少其低频振动。Zhao 等[5] [6] [7]通过从噪声和振动激励源、模态分布、传递路径、评估方式等方面研究控制方法,分析和解决了产品开发过程中的 NVH 问题,为控制混合动力电动汽车的噪声和振动性能提供了明确的工作方向。

假设混动汽车将受到 m 个激励力作用,而每一个激励力包含 x 、 y 、 z 三个方向的分量,每个分量对应 n 个特定传递路径,因此激励力分量和对应的某个传递路径就会形成一个系统响应分量。将车内噪声

声压看作系统响应，假设该系统为线性系统，由结构力输入而形成的声压或振动表示为：

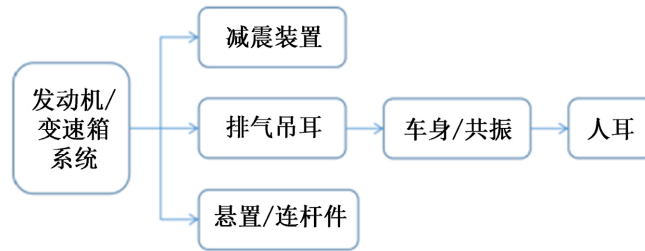


Figure 1. Interior noise transmission path of hybrid electric vehicle
图 1. 混合动力总成车内噪声传递路径

$$P_{mnk} = \sum H_{mnk}(\omega) \times F_{mnk}(\omega) \quad (2-1)$$

式中 $H_{mnk}(\omega)$ 是传递函数， $F_{mnk}(\omega)$ 是激励力。

从式(2-1)可知辨别激励源与传递路径是解决声压与振动的主要方向。结构振动的频率和幅度一旦发生较大的变化，尤其是在车辆高速行驶的现状，将会进一步导致噪声的产生，控制激励源是降低噪声提高汽车 NVH 性能最根本的措施。

3. NVH 测试结果分析

针对某 HEV 混动车在 4000 rpm 左右的转速时，车内会产生明显的轰鸣声，车身抖动严重，与车身结构以及动力总成有很大的联系。初步评估为动力总成混动总成机电耦合器模态低，刚度不足，引起一阶弯曲模态共振，因此需对现动力总成做了模态设定目标值，以做刚度提升。

首先针对样车在发动机转速为 4000 rpm 时车内抖动及轰鸣严重这一现象，对标车型三组不同的动力总成组合下的一阶弯曲模态进行了测试，分别为：1) 对标总成 LV5：某车型 LV5；2) 对标总成 LV1：某车型 LV1；3) 开发车型：HEV 总成 LV1。HEV 动力总 LV1 的 ODS 及整车边界模态测试布点如下图 2 所示。

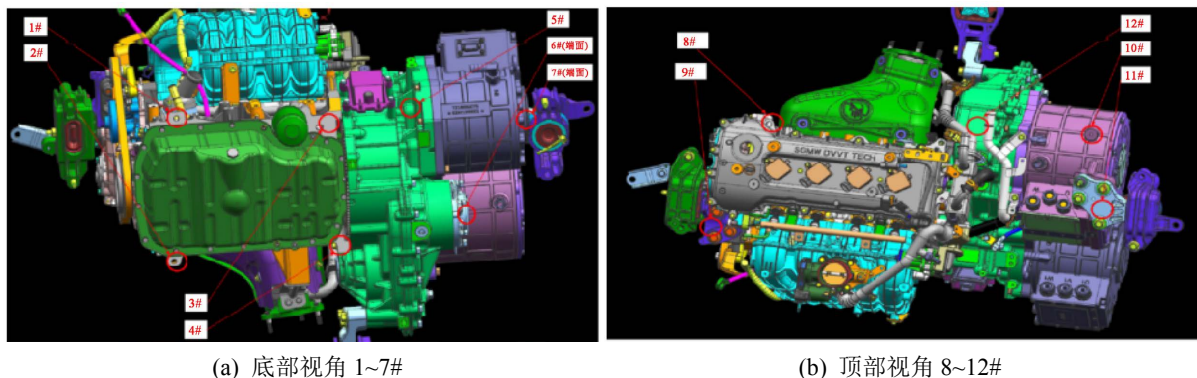
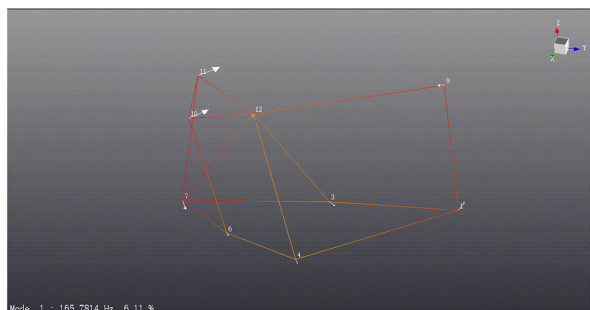


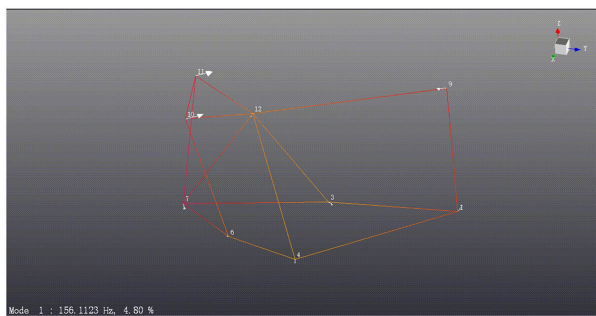
Figure 2. Layout LV1 of HEV with the vehicle boundary test
图 2. HEV 动力总成 LV1 及整车边界模态测试布点

通过测试，发现对标总成 LV5 配置的一阶弯曲模态为 165 Hz，对标总成 LV1 配置的一阶弯曲模态为 156 Hz，而开发车型 HEV 动力总成 LV1 的一阶弯曲模态只有 138 Hz，其模态测试如图 3 所示。在主观感受方面，HEV 总成 LV1 在发动机 4000 rpm 左右的转速时，轰鸣声车内感知明显，而对标总成 LV1 在发动

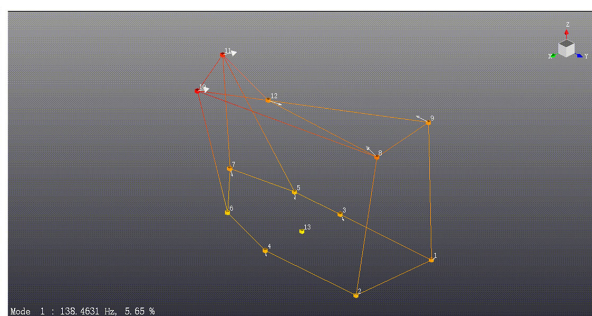
机 4000 rpm 左右时, 车内轰鸣不明显。对标总成 LV5 在发动机 4000 rpm 左右的转速时, 轰鸣声最小, 主观体验舒适, 说明动力总成的一阶模态是影响车内轰鸣声的主要因素。因此, 对所开发车 HEV 动总 LV1 需从增强结构刚度以及加强个部件之间的连接提升动力总成的一阶弯曲模态, 进而改善这一振动噪声问题。



(a) 对标总成一 LV5 配置



(b) 对标总成二 LV1 配置



(c) 开发车型 HEV 总成 LV1 配置

Figure 3. First order bending modal of three different powertrain combinations

图 3. 三组不同动力总成组合的一阶弯曲模态测试图

4. 混动总成刚度提升与激励源避频

4.1. 刚度提升

通过模态理论分析, 结构的模态与其刚度是成正比关系的, 因此提升混动总成的模态先做刚度提升, 以满足 HEV 总成 LV1 的一阶弯曲模态的设计要求。

经过分析研究, 发现对油底壳部件进行局部的特征加强, 可以提高整个总成结构的模态, 并对减轻重量有一定的帮助。原方案数模如下图 4(a)所示, 为了提升一阶弯曲模态设计了三种方案, 分别为:

方案一: 将油底壳改成铝合金材质;

方案二: 在两电机之间采用支架连接;

方案三: 油底壳改成铝合金材质且在两电机之间采用支架连接, 即为方案一与方案二的组合。三种方案如下图 4 所示。

4.2. 模态优化与避频

根据测试结果, 在 4000 rpm 左右的转速时, HEV 总成 LV1 一阶弯曲模态为 138 Hz, 有限元仿真时, 动力总成的自由模态乘以 1.3~1.5 系数换算成约束模态, 在此取 1.5。仿真的自由模态应大于 210 Hz 时可以达到避频的目的。

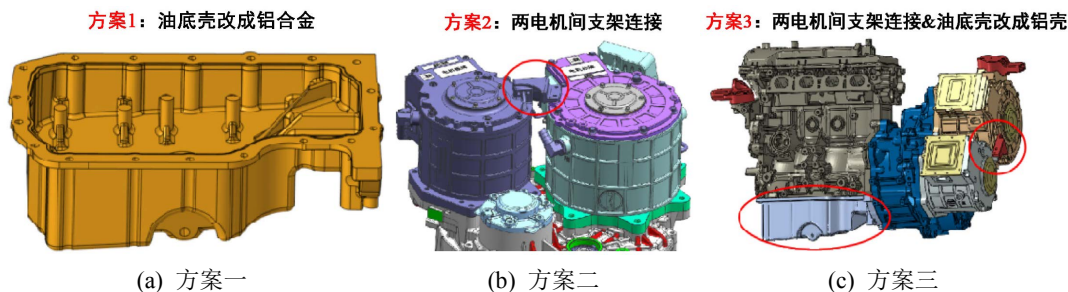


Figure 4. Three optimization schemes for design
图 4. 三种优化设计方案

对动力总成模型进行有限元分析，采用四面体 C3D4 网格对改模进行划分，尺寸 3 mm，壳体材料采用非线性材料，各连接螺栓采用刚性耦合连接，各轴承位轴承外圈外表面与壳体做接触，内表面刚性耦合在一个点。对三个悬置点设置其悬置刚度，按 350 N/mm 进行约束定义，如下图 5 所示。其余各组成部分的质量输入按表 1 所示进行设置。

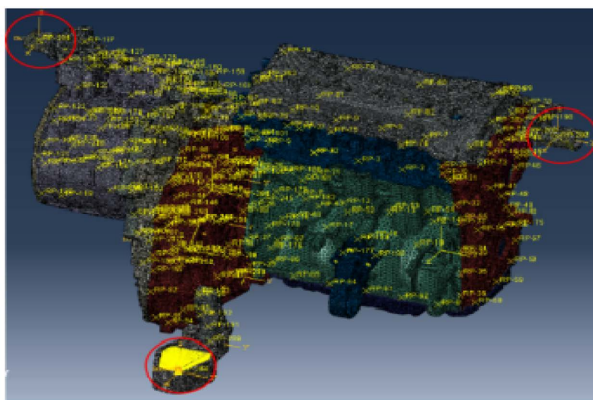


Figure 5. Finite element model of HEV powertrain
图 5. 动力总成有限元模型

Table 1. The finite element of input mass (Kg)

表 1. 有限元各部分输入质量(Kg)

动力总成	发动机	发电机	驱动电机	DHT	悬挂半轴	其他附件及油
281.3	116.9	30	51	阿尔特 44 纳铁福 47.4	11	28.4

经过仿真分析，HEV 总成 LV1 原方案的一阶弯曲模态为 142 Hz，二阶模态为 223 Hz，属于偏低状态。方案 1 的一阶弯曲模态为 148 Hz，二阶模态为 232 Hz；方案 2 的一阶弯曲模态为 180 Hz，二阶模态为 244 Hz；方案 3 的一阶弯曲模态为 199 Hz，二阶模态为 278 Hz，其有限元的一阶模态和二阶模态分别如图 6 和图 7 所示。结果表明原方案以及三种由优化设计的方案一阶弯曲模态都没有达到 210 Hz 的设计要求。

通过进一步的研究发现，提高 DHT 壳体的刚度，可以提高 HEV 总成 LV1 的一阶弯曲模态。针对这个部件设计了三种方案：新方案 1：增加加强筋，新方案 2：加强筋+加强连接边；新方案 3：优化壳体结构。如下图 8 所示。

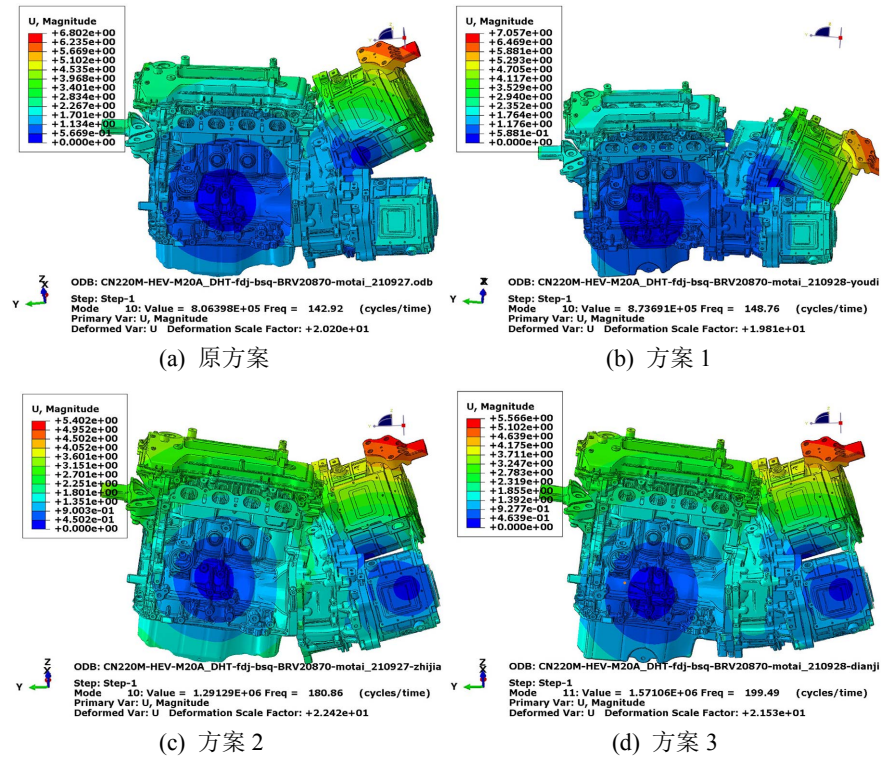


Figure 6. First order bending modes of three schemes
图 6. 三种方案的一阶弯曲模态

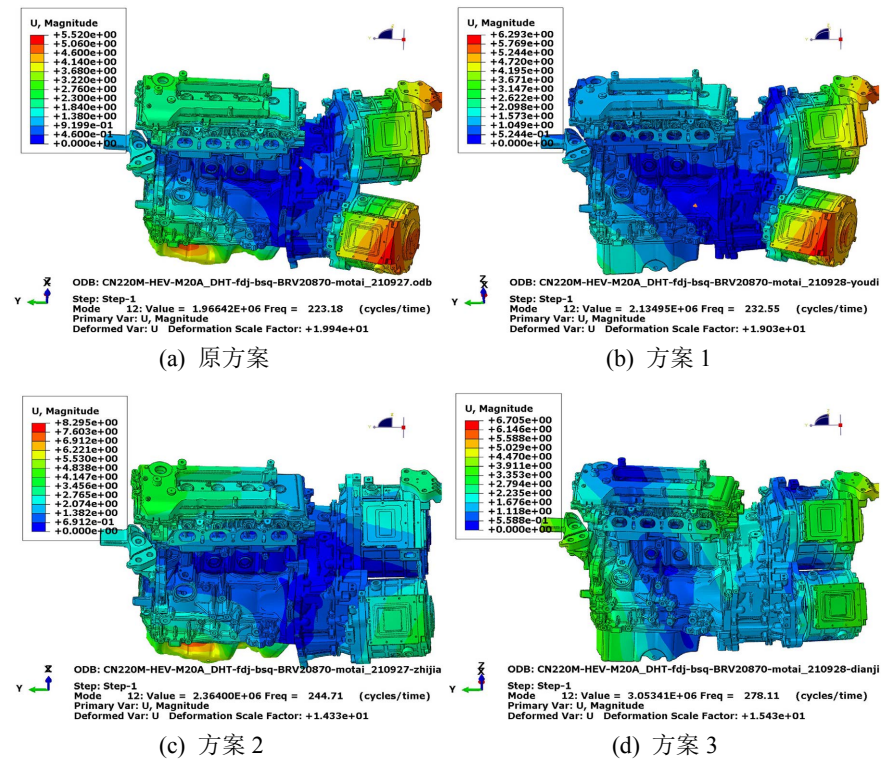


Figure 7. Second order modal diagrams for three schemes
图 7. 三种方案的二阶模态图

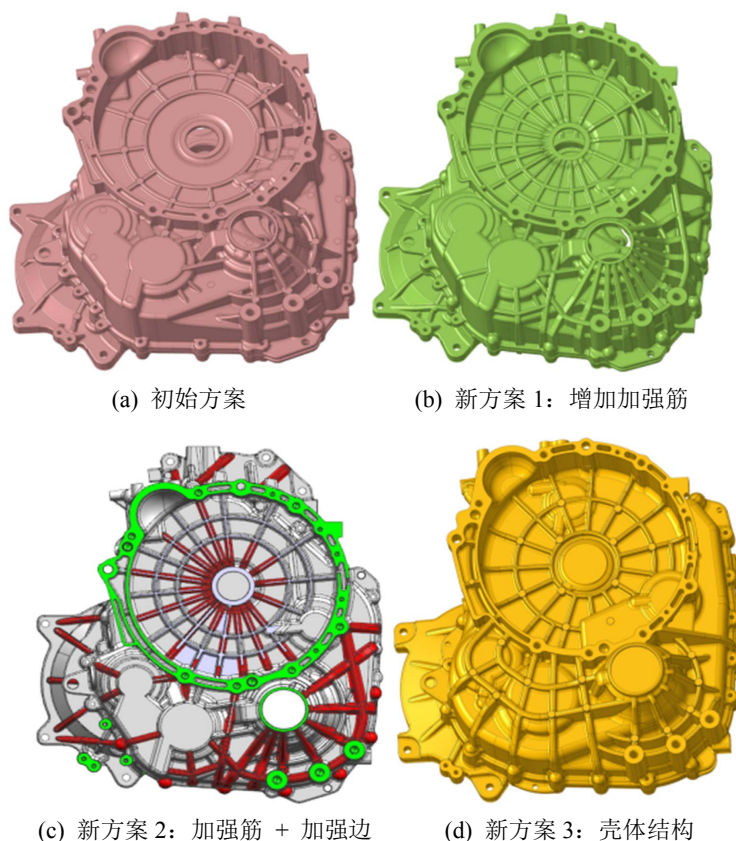


Figure 8. The original scheme of DHT shell and three new design schemes
图 8. DHT 壳体的原方案以及三种新设计方案

再将这三种方案分别与 4.1 节所述的三种方案进行组合计算自由模态,其中新方案 2 与 4.1 中的方案 2 与方案 3 组合,并在两电机间用铝支架连接。其他 2 种新方案电机间支架均是采用虚拟连接来模拟。每个组合的一阶弯曲模态如图 9 所示,二阶模态如图 10 所示。

分析结果如表 2 所示,通过对比分析,采用新方案 3 与两电机间加支架&材料改成铝壳的组合后,一阶弯曲模态能达到 210 Hz 的避频要求。二阶弯曲模态也能达到 292 Hz 以上,所以基本上都能实现混动总成的模态解耦。

5. 结果验证

采用新方案 3 的 DHT 壳体、两电机间支架连接以及油底壳改成铝壳的组合的方式,实施到样车上进行试验验证,观察其是否对在 4000 rpm 左右的转速时,车内会产生明显的轰鸣声,车身抖动严重问题有较大改善。

将麦克风放置在前排、中排、第三排位置,在方向盘、座椅导轨测试其振动效果。

通过实车测试,当发动机转速 4000 rpm 以上,对应车速为 60 km/h,如图 11 所示,新方案 3 的绿线总声压级与二阶噪声于 20~80 Hz 间差值在均为 15 dB (A)以上,相比之前状态(红线),车内轰鸣降低了 1~2 dB (A)。主观评价地板及方向盘不抖,主观评价符合开发要求。如图 12 所示,将整车放在举升机上,在动力总成上布置 12 个测点进行模态测试。结果表明,混动总成的一阶弯曲模态为提升为 205 Hz,相比初始状态的 138 Hz,提升了 67 Hz,与仿真结果的 211 Hz 非常接近。不仅实现了混动总成的解耦,且验证了仿真结果的可靠。如图 13,混动总成的传递函数在 205 Hz 有峰值,相位有变化,也充分说明混动总成

的固有频率提高到了 205 Hz，能实现混动总成的避频与隔振要求。如 14，倒挡 50%油门加速工况，也无明显啸叫，车内没有出现啸叫的阶次噪声。同时，主观评价 4000 rpm 的车内噪声也达到接受水平。

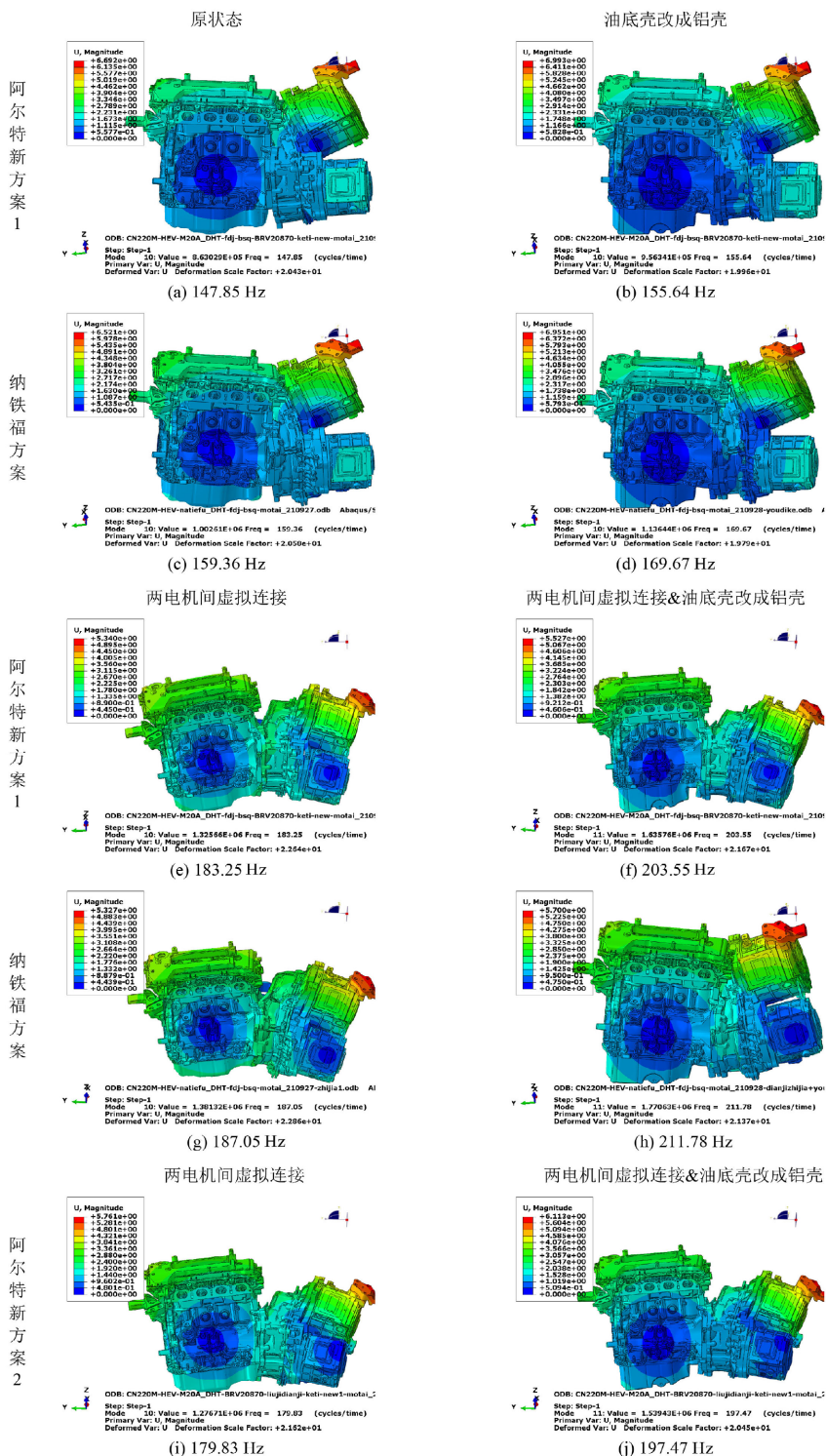
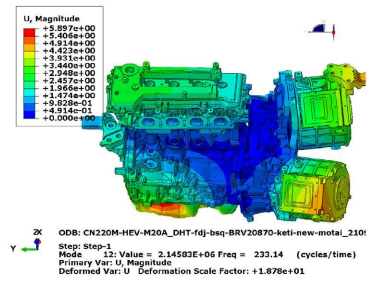
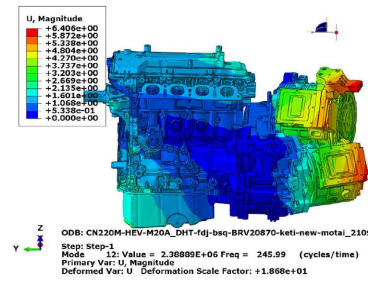


Figure 9. First order bending modal cloud diagram of hybrid assembly
 图 9. 混动总成一阶弯曲模态云图

阿尔特新方案 1

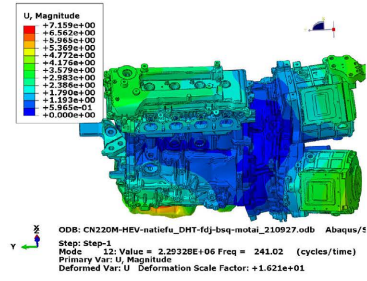


(a) 233.14 Hz

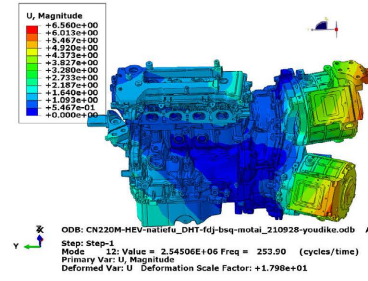


(b) 245.99 Hz

纳铁福方案

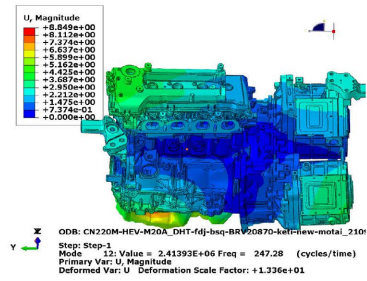


(c) 241.02 Hz



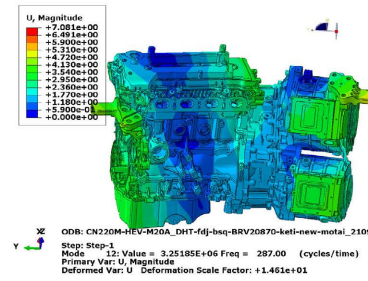
(d) 253.90 Hz

两电机间虚拟连接



(e) 247.28 Hz

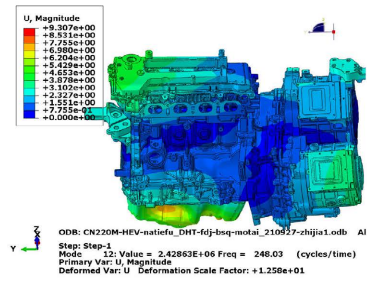
两电机间虚拟连接&油底壳改成铝壳



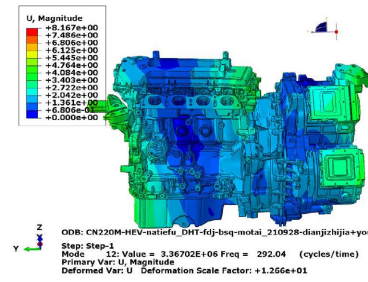
(f) 287 Hz

阿尔特新方案 1

纳铁福方案

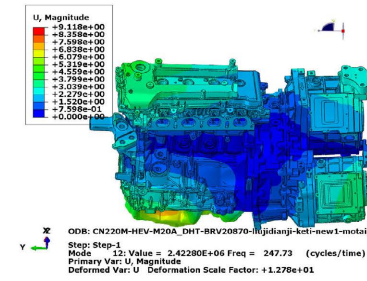


(g) 248.03 Hz



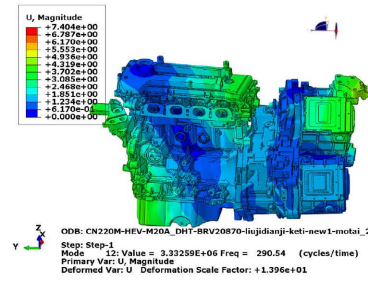
(h) 292.04 Hz

两电机间虚拟连接



(i) 247.73 Hz

两电机间虚拟连接&油底壳改成铝壳



(j) 290.54 Hz

阿尔特新方案 2

Figure 10. Second order modal cloud diagram of hybrid assembly
图 10. 混动总成二阶模态云图

Table 2. First order bending mode and second order mode at different group schemes
表 2. 各组合一阶弯曲模态与二阶模态

方案	一阶弯曲模态(Hz)			
	原方案	方案 1	方案 2	方案 3
	原状态	油底壳改成铝壳	两电机间支架连接	两电机间支架连接&油底壳改成铝壳
初始方案	142	148	180	199
新方案 1	147	155	183	203
新方案 2	--	--	179	197
新方案 3	159	169	187	211
二阶模态(Hz)				
初始方案	223	232	244	278
新方案 1	233	245	247	287
新方案 2	--	--	247	290
新方案 3	241	253	248	292

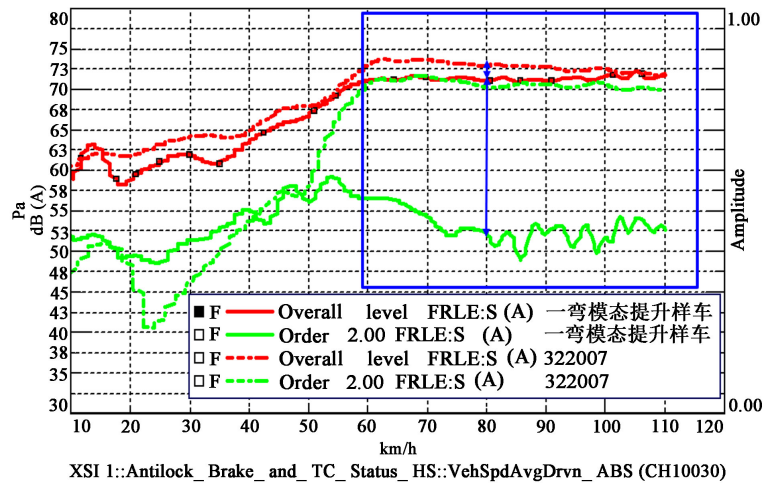


Figure 11. Sound pressure diagram at DG-WOT condition

图 11. DG-WOT 工况 - 车内声压测试图

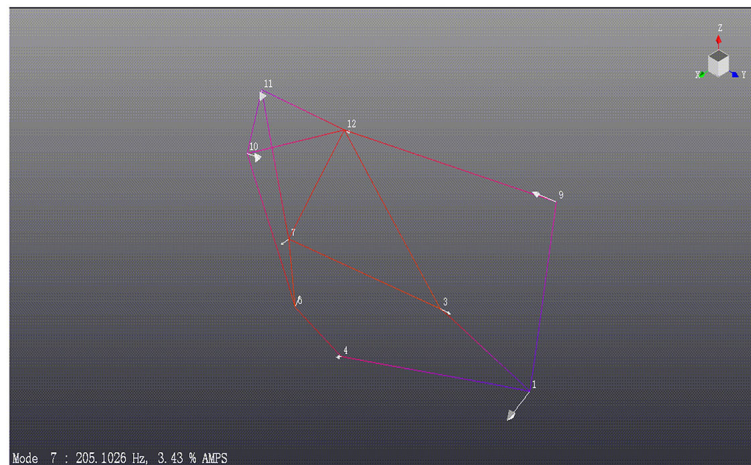


Figure 12. First order bending modal of powertrain test

图 12. 动力总成一阶弯曲模态测试图

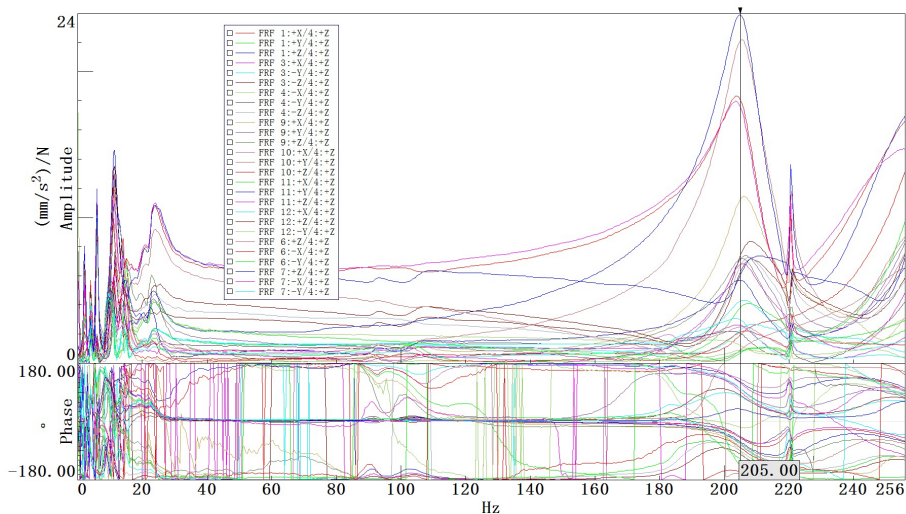


Figure 13. Powertrain transfer function diagram

图 13. 动力总成的传递函数图

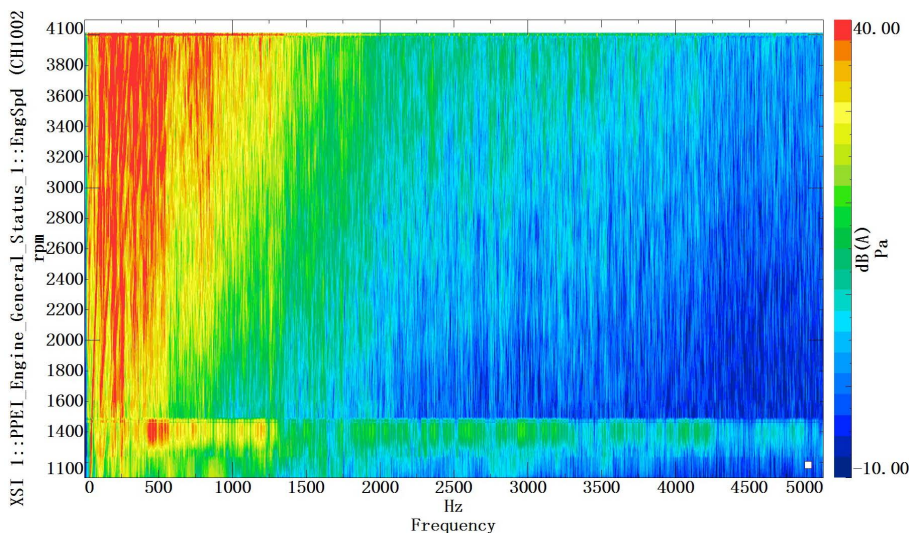


Figure 14. Howling at acceleration status

图 14. 加速叫啸结果图

6. 结论

本文通过对 HEV 混动总成的模态共振问题分析，以刚度提升的策略，结合仿真分析与试验验证解决了车内轰鸣的问题，主要有以下结论：

1) 提出了一种测试与仿真相结合解决 HEV 混动总成 LV1 共振的方法。经过测试发现混动总成一阶弯曲模态仅为 138 Hz，没有达到开发目标要求的 210 Hz。

2) 采用刚度提升的策略，并以仿真优化的方式提升了混动总成的一阶模态。通过有限元分析和方案组合，分析出了采用 DHT 壳体、两电机间加支架连接以及油底壳改成铝壳的组合方案，一阶弯曲模态达到了 211 Hz。

3) 试验结果表明所提出的方法解决了 HEV 总成 LV1 的共振问题。新方案 3 在混动总成在 4000 rpm 左右的转速时，20~80 Hz 范围内振动降低了 15 dB 以上，并无啸叫声，达到了接受水平。

致 谢

感谢上汽通用五菱汽车股份有限公司、孔辉科技和湖南大学相关领导、工程师和研究生在问题分析与解决中提供的大力支持。

基金项目

广西创新驱动重大专项(桂科 AA19182003), 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY1412)。

参考文献

- [1] 中国应对气候变化的政策与行动[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content_5646697.htm, 2021-10-27.
- [2] Stapelbroek, M., Lahey, H.P. and Ogrzewalla, D. (2013) Hybrid Operation Strategy of a New Axle-Split Hybrid. 2nd International CTI Symposium.
- [3] Yue, M.Y., Zhou, Y.D. and Gai, M. (2015) Research Progress on Deep Hybrid Vehicle NVH Problem. *Machinery Design & Manufacture*, 268-271. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2015.02.072>
- [4] Eisele, G., Wolff, K., Wittler, M., *et al.* (2010) Acoustics of Hybrid Vehicles. *International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress-Sustainable Nvh Solutions Inspired by Ecology & Economy*. Detroit Diesel, American, 1-15. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1402>
- [5] Zhao, T.H., Lu, B.W. and Cao, Y.T. (2012) NVH Control Technology of Hybrid Electric Vehicle. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, **42**, 1373-1377.
- [6] Cheng, Y.H., Nobuo, A., *et al.* (2017) Analysis and Countermeasures of Certain Vehicle Idling and Low Speed Booming. *The 19th Asia-Pacific Automotive Engineering Annual Conference and 2017 China Society of Automotive Engineering Annual Conference*, Shanghai, China, October 2017, 1144-1149.
- [7] Xu, T. and Zhang, L. (2017) Research Progress on the NVH Problem of Deep Hybrid Electric Vehicles. *Auto Time*, 10-11.